



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 100 54 853 A 1**

⑤1 Int. Cl. 7:
B 23 K 26/38

②1 Aktenzeichen: 100 54 853.9
②2 Anmeldetag: 6. 11. 2000
④3 Offenlegungstag: 1. 8. 2002

DE 100 54 853 A 1

Mit Einverständnis des Anmelders offengelegte Anmeldung gemäß § 31 Abs. 2 Ziffer 1 PatG

⑦1 Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

⑦2 Erfinder:
Pötz, Detlev, Dr., 70193 Stuttgart, DE; Rapp,
Juergen, Dr., 73733 Esslingen, DE; Heintges, Oliver,
70197 Stuttgart, DE; Wais, Johannes, Dr., 71701
Schwieberdingen, DE; Westphal, Claus, 71723
Großbottwar, DE; Callies, Gert, Dr., 70178 Stuttgart,
DE; Chomienne, Stephane, 70469 Stuttgart, DE;
Wawra, Thomas, 89558 Böhlenkirch, DE;
Schneider, Rainer, Dr., 31171 Nordstemmen, DE;
Eisemann, Achim, 74196 Neuenstadt, DE; Honer,
Michael, 70499 Stuttgart, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:

EP 09 50 463 A1
WO 01 28 734 A1

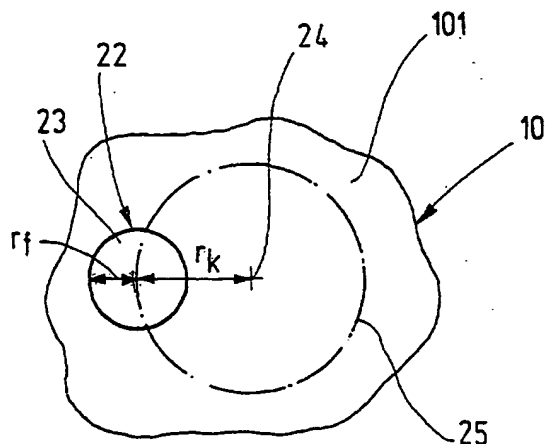
DAUSINGER, F. [u.a.]: Bohren keramischer Werk-
stoffe mit Kurzpuls-Festkörperlaser. In: Laser
Opto, 1999, H. 3, S. 78-85;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zum Einbringen eines Mikrolochs in ein vorzugsweise metallisches Werkstück und Vorrichtung hierzu

⑤7 Es wird ein Verfahren zum Einbringen eines Mikrolochs in ein vorzugsweise metallisches Werkstück (10) mittels eines Laserstrahls (22) angegeben, bei dem der Laserstrahl (22) auf das Werkstück (10) fokussiert und der Fokus (23) fortlaufend auf einer zur Lochachse (24) konzentrischen Kreisbahn (25) entlangbewegt wird. Zur Erzielung einer hohen Lochqualität ohne Materialaufwürfe und -grate ist der Laserstrahl (22) aus einer Folge von kurzen Laserpulsen zusammengesetzt, die eine konstante, sehr kleine Pulsdauer im Nanosekundenbereich, vorzugsweise kleiner als 100 ns, aufweisen (Fig. 2).



DE 100 54 853 A 1



Beschreibung

Vorteile der Erfindung

Stand der Technik

[0001] Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zum Einbringen eines Mikrolochs in ein vorzugsweise metallisches Werkstück mittels eines Laserstrahls nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Bei einem bekannten Verfahren zur Erzeugung von Mikrolöchern im Bereich unterhalb 150 µm mittels eines Laserstrahls, z. B. zur Herstellung von Einspritzdüsen für Brennkraftmaschinen (DE 199 05 571 A1) wird durch Einstellung der Strahlgeometrie und/oder der Strahlparameter des Laserstrahls, wie Fokussierzahl und Leistungsdichte, eine definierte Lochgeometrie erzeugt. Dabei wird der Lochdurchmesser am Locheintritt von dem Fokusedurchmesser des auf die Werkstückoberfläche fokussierten Laserstrahls bestimmt und der weitere Lochverlauf sowie der Durchmesser am Lochaustritt durch die Strahlkaustik, die Laserpulsintensität und die Strahlqualität beeinflusst. Zusätzlich wird der Laserstrahl in eine Taumelbewegung versetzt, wobei der Laserstrahl mit der Kreisfrequenz ω so rotiert, daß seine Strahlachse eine Kegelmantelfläche beschreibt und damit der Fokus auf dem Werkstück längs einer zur Lochachse konzentrischen Kreisbahn entlanggeführt wird. Alternativ kann anstelle der Taumelbewegung des Laserstrahls auch das Werkstück um eine Rotationsachse drehen, wobei der Laserstrahl dann unter einem spitzen Winkel zur Rotationsachse des Werkstücks geneigt feststehend ausgerichtet ist. Zur Erzielung eines zum Lochaustritt hin sich konisch erweiternden Lochquerschnitts werden Fokusedurchmesser und Leistungsdichte des Laserstrahls entsprechend gewählt, wobei sich durch die Aufweitung des Laserstrahls hinter dem Fokus und durch genügend hohe Leistungsdichte des Laserstrahls das Konusprofil beeinflussen läßt.

[0003] Bei einem solchen sog. Laserbohrverfahren wird an der Auftreffstelle des Lasers auf dem Werkstück das Material durch Verflüssigung und Verdampfung abgetragen. Dabei entstehen aufgrund der thermischen Einwirkung auf das Werkstückmaterial Schmelzaufwürfe und -grate, die die Lochqualität erheblich beeinträchtigen und zu ihrer Beseitigung aufwendige und teure Nachverarbeitungsverfahren erfordern.

[0004] Es ist bereits eine Vorrichtung zum Materialabtragen bei Werkstücken mittels Laserstrahl vorgeschlagen worden, (DE 199 20 813) bei der zur Verbesserung der Bohrqualität der auf das Werkstück auftreffende Laserstrahl aus mindestens zwei Arten von Laserpulsen zusammengesetzt ist, die sich hinsichtlich der Laserwellenlänge und/oder der Pulsdauer und/oder der Laserintensität und/oder des Pulsabstandes unterscheiden. Durch die Laserpulse längerer Pulsdauer wird selbst bei geringer Laserintensität ein großer Materialabtrag und damit ein schneller Bohrfortschritt bewirkt, während die Laserpulse mit kurzer Pulsdauer, insbesondere bei hoher Laserintensität, für eine starke Plasmabildung sorgen, die Ablagerungen von Material auf der Bohrungswand beseitigt, so daß sich die Bohrpräzision erhöht. Dabei treffen die Laserpulse unterschiedlichen Typs wechselweise auf das Werkstück. Die beiden Arten von Laserpulsen können mit einem oder mit zwei getrennten Lasern erzeugt werden, wobei die Laserstrahlen mittels einer Optikanordnung zusammengeführt werden. Im letzteren Fall können die beiden getrennten Laseranordnungen hinsichtlich ihrer Wirkungsweise optimiert, d. h. der eine Laser zur Erzielung einer großen Bohrgeschwindigkeit und der andere Laser zur Erzeugung einer hohen Bohrpräzision ausgelegt, werden.

[0005] Das erfindungsgemäße Verfahren hat den Vorteil, daß der Laserstrahl ausschließlich aus Laserpulsen sehr kurzer Pulsdauer, vorzugsweise kleiner als 100 ns, besteht und dadurch die beim Laserbohren sich am Loch ausbildende Schmelzfilmdicke kleiner wird, womit die Bohrqualität ansteigt. Da mit kürzer werdender Pulsdauer auch die Pulsenergie sinkt, wird eine Vielzahl von Pulsen benötigt, um eine gewünschte Lochtiefe zu erzeugen. Um die Bohrgeschwindigkeit zu erhöhen wird daher fortlaufend der Fokus des Laserstrahls auf einer zur Bohrungsachse konzentrischen Kreisbahn entlanggeführt, wobei das Werkstückmaterial in kleinen Schritten und im wesentlichen in der dampfförmigen Phase abgetragen wird. Der Bohrfortschritt erfolgt dabei wendel- oder schraubenlinienförmig entlang der Wandung des zu erzeugenden Lochs, wobei der Lochdurchmesser von dem gewählten Radius der Kreisbahn abhängig ist. [0006] Durch die in den weiteren Ansprüchen 2-8 aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen des im Anspruch 1 angegebenen Verfahrens möglich.

[0007] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird beim Laserbohren zusätzlich der Laserstrahl in Rotation um seine Strahlachse versetzt. Hierdurch wird ein ggf. ungleichmäßiger oder unrunder Laserstrahlquerschnitt im Fokus kompensiert und kann sich nicht auf die Rundheit des Lochs auswirken. Die in das Werkstück eingebrachten Löcher zeichnen sich durch eine sehr hohe Präzision bezüglich ihrer Rundheit aus.

[0008] Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung kann das zu erzeugende Loch mit einer definierten Konizität hergestellt werden, wenn die Lage des Fokus des Laserstrahls relativ zur Werkstückoberfläche in Achsrichtung des Lochs verändert und/oder die Fokussierzahl verändert wird und/oder mit zunehmender Eindringtiefe des Laserstrahls in das Werkstück die Pulsenergie erhöht wird. Durch Variation der Pulsenergie lassen sich sowohl zylindrische Löcher als auch solche mit negativer oder positiver Konizität gezielt herstellen. Die Fokussierung ist als Position des Laserfokus gegenüber der Oberfläche des Werkstücks definiert. Mit ihr wird die Lage der Strahlkaustik bezüglich des Werkstücks bestimmt. Durch Ausnutzung der Strahlkaustik kann die Aufweitung des Lochs am Lochaustritt beeinflusst werden. Eine wesentliche Rolle bei der Beeinflussung der Konizität spielt die Fokussierzahl, die definiert ist als Quotient aus der Brennweite der Linse zur Fokussierung des Laserstrahls und dem Strahldurchmesser auf der Linse. Diese Fokussierzahl legt den Verlauf der Strahlkaustik fest. Je kleiner die Fokussierzahl ist, desto kleiner ist der Fokusedurchmesser und desto stärker ist die nach dem Fokus sich anschließende Aufweitung des Laserstrahls. Damit läßt sich für eine vorgegebene Lochtiefe durch Verkleinerung der Fokussierzahl das Loch zum Lochaustritt hin besser aufweiten. [0009] Eine Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist in Anspruch 9 angegeben.

[0010] Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform dieser Vorrichtung weist diese ein Werkstückhalterung mit fünf Freiheitsgraden zur Werkstückpositionierung bezüglich des Laserstrahls auf. Damit läßt sich das Werkstück exakt positionieren, so daß Mikrolöcher unter beliebigen Einstechwinkeln in das Werkstück eingebracht werden können. Durch eine gezielte Kippung des Werkstücks gegenüber dem einfallenden Laserstrahl mit gleichzeitiger Rotation des Werkstücks um die Lochachse läßt sich auch die Konizität des Mikrolochs beeinflussen.



Zeichnung

[0011] Die Erfindung ist anhand eines in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiels in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen in schematischer Darstellung:

[0012] Fig. 1 eine Vorrichtung zum Einbringen eines Mikrolochs in ein Werkstück mittels eines Laserstrahls,

[0013] Fig. 2 eine Draufsicht des Strahlquerschnitts im Fokus des auf die Werkstückoberfläche fokussierten Laserstrahls, vergrößert dargestellt,

[0014] Fig. 3 eine perspektivische Darstellung der Wendelbewegung des Strahlflecks über die zunehmende Lochtiefe,

[0015] Fig. 4 drei unterschiedliche Fokusslagen des Laserstrahls bezüglich der Werkstückoberfläche,

Beschreibung des Ausführungsbeispiels

[0016] Die in Fig. 1 schematisch skizzierte Vorrichtung zum Einbringen eines Mikrolochs in der Größenordnung von kleiner 150 μm in ein Werkstück 10 weist einen Laser-generator 11, eine Aufweitungsoptik 12, eine Trepanieroptik 13 und eine 1 Fokussiereinheit 14 auf, die vorzugsweise alle in einem Gehäuse 15 zusammengefaßt sind, aus dessen Gehäusekopf 151 die Laserstrahlung austritt. Das vorzugsweise metallische Werkstück 10 ist in einer dem Gehäusekopf 151 gegenüberliegenden Werkstückhalterung 16 eingespannt, die fünf translatorische und rotatorische Freiheitsgrade aufweist. Die Werkstückhalterung 16 besteht aus einem das Werkstück 10 unmittelbar aufnehmenden Haltekopf 17 und einem Stellaggregat 18 für den Haltekopf 17. Die Istage des Haltekopfes 17, und damit des Werkstücks 10, wird mittels eines Istwertgebers 19 erfaßt und als Istwertsignal an einen Rechner 20 gegeben. Mittels einer Sollwerteingabe 21 läßt sich der Rechner 20 derart programmieren, daß er über das Stellaggregat 18 den Haltekopf 17 in eine vorgegebene Position bzw. nacheinander in verschiedene vorgegebene Positionen einstellt.

[0017] Der Lasergenerator 11, der beispielsweise ein Festkörperlaser mit einem Resonator sein kann, wie er in der DE 199 20 813 beschrieben ist, erzeugt einen aus einer Vielzahl von kurzen Laserpulsen zusammengesetzten Laserstrahl 22, der in Fig. 1 strichliniert angedeutet ist. Die Laserpulse haben eine extrem kurze Pulsdauer von kleiner 100 ns und eine Pulsenergie von 1 mJ bis 7 mJ. Die Laserpulse weisen eine Laserwellenlänge auf, die im nahen Infrarot oder Ultraviolett oder im sichtbaren grünen Bereich liegt. Der Laserstrahl 22 wird mit Hilfe der dem Lasergenerator 11 im Laserstrahlengang nachgeordneten Aufweitungsoptik 12 aufgeweitet und mit der der Trepanieroptik 13 nachgeordneten Fokussiereinheit 14 auf das Werkstück 10 fokussiert. Als Aufweitungsoptik 12 kann eine teleskopartige Linsenanordnung verwendet werden, die den Querschnitt des Laserstrahls 22 aufweitet. Durch die Aufweitung des Laserstrahls 22 und die anschließende Fokussierung ist die Energiedichte im Fokus so hoch, daß mit dem fokussierten Laserpuls Material am Werkstück abgetragen werden kann. Die Trepanieroptik 13, die beispielsweise aus zwei gegeneinander verdrehbaren Keilplatten bestehen kann, neigt den aufgeweiteten Laserstrahl 22 um einen kleinen spitzen Winkel zu ihrer Optikachse und versetzt den geneigten Laserstrahl 22 in Rotation, wodurch der Fokus 23 (Fig. 2) des Laserstrahls 22 auf der Oberfläche 101 des Werkstücks 10 fortlaufend entlang einer zur Achse 24 des einzubringenden Lochs konzentrischen Kreisbahn 25 bewegt wird (Fig. 2). Der erzielbare Lochdurchmesser hängt dabei von dem Radius r_k der Kreisbahn 25 ab. Er ist größer als der Durchmesser der Kreisbahn

25 und nimmt bei einem Kreisbahnradius $r_k = 0$ den Durchmesser an, der einem Lochdurchmesser ähnlich einer Perkussionsbohrung mit dem Strahlquerschnitt $2r_f$ entspricht. Die Trepanieroptik 13 wird von dem Rechner 20 gesteuert, und durch eine zweite Sollwerteingabe 26 kann der Anstellwinkel des Laserstrahls 22 verändert und damit der gewünschte Trepanierdurchmesser $2r_k$ vorgegeben werden. Der Lochdurchmesser ergibt sich dann näherungsweise aus der Summe des Trepanierdurchmessers $2r_k$ und des Lochdurchmessers bei $r_k = 0$. Zur Verkürzung der Baulänge des Gehäuses 15 ist zwischen der Trepanieroptik 13 und der Fokussiereinheit 14 ein Umlenkspiegel 27 angeordnet, der den Laserstrahl um 90° umlenkt.

[0018] Mit der beschriebenen Vorrichtung wird ein Mikroloch in das Werkstück 10 dadurch eingebracht, daß der aus den kurzen Laserpulsen bestehende Laserstrahl 22 auf die Oberfläche 101 des Werkstücks 10 fokussiert wird und der Fokus 23 des Laserstrahls 22, d. h. der Strahlquerschnitt des Laserstrahls 22 im Fokuspunkt, durch die Trepanieroptik 13 auf der Kreisbahn 25 entlangbewegt wird, deren Mittelpunkt die Lochachse 24 des zu erzeugenden Lochs festlegt (Fig. 2). Bei einer Werkstückdicke von bis zu 2 mm werden für die vollständige Durchbohrung des Werkstücks 10 mehrere tausend Laserpulse benötigt. Durch die kreisförmige Bewegung des Fokus 23 des Laserstrahls 22 entlang der durch die Neigung des Laserstrahls 22 vorgegebenen Kreisbahn 25 wird das Werkstückmaterial in kleinen Schritten und im wesentlichen in der dampfförmigen Phase abgetragen, wobei der Bohrfortschritt entlang der Wandung des zu erzeugenden Lochs erfolgt. Der dabei entstehende wendelförmige Bohrfortschritt durch den auf einer wendel- oder spiralförmigen Bahn sich bewegenden Strahlquerschnitt oder Strahlfleck, der auf der Oberfläche des Werkstücks 10 im Fokus 23 liegt, ist in Fig. 3 skizziert. Die Rundheit des erzeugten Lochs wird dadurch verbessert, daß der Laserstrahl 22 noch zusätzlich um seine Strahlachse rotiert, so daß Unrundheiten des Strahlquerschnitts im Fokus 23 in ihrem Einfluß auf die Rundheit des zu erzeugenden Lochs kompensiert werden.

[0019] Wie aus Fig. 2 ersichtlich ist, ist der Durchmesser des erzeugten Lochs größer als der Durchmesser der festgelegten Kreisbahn 25 und ergibt sich näherungsweise aus der Summe des Kreisbahn- oder Trepanierdurchmessers $2r_k$ und des Lochdurchmessers bei $r_k = 0$. Der Trepanierradius kann beliebig gewählt werden. Im Falle des Trepanierradius $r_k = 0$ wird der Bohrfortschritt durch Perkussieren erzielt, und der Durchmesser des erzeugten Lochs nimmt einen Durchmesser an, der einem Lochdurchmesser ähnlich einer Perkussionsbohrung mit dem Strahlquerschnitt $2r_f$ entspricht. Durch entsprechende Ausrichtung des im Haltekopf 17 eingespannten Werkstücks 10 kann das gewünschte Loch unter beliebigen Einstechwinkeln in das Werkstück 10 eingebracht werden.

[0020] Durch geeignete Beeinflussung der Strahlparameter des Kurzpulslasers lassen sich auch definiert konische Mikrolöcher in das Werkstück 10 einbringen. Dabei bestimmt die Fokusslage, das ist die Position des Fokus 23 gegenüber der Oberfläche 101 des Werkstücks 10, die Strahl Ausbreitung im Werkstück 10. Da der fokussierte Laserstrahl 22 sich nach dem Fokus 23 aufweitet, kann durch eine Verschiebung der Fokusslage die Konizität des erzeugten Lochs verändert werden. In Fig. 4 ist dies für eine Werkstückdicke von ca. 2 mm angedeutet. Fig. 4B zeigt dabei die Fokusslage Null, bei welcher der Fokus 23 auf der Oberfläche 101 des Werkstücks 10 liegt. Das Mikroloch hat einen im wesentlichen zylindrischen Verlauf mit geringer Lochaufweitung zum Lochaustritt hin. In Fig. 4A ist eine negative Fokusslage gezeigt, bei welcher der Fokus 23 am Lochaustritt liegt. Da-



durch wird eine sog. negative Konizität erzeugt, bei welcher der Lochquerschnitt vom Locheintritt zum Lochaustritt hin abnimmt. In Fig. 4C ist eine positive Fokusslage dargestellt, bei welcher der Fokus 23 oberhalb der Oberfläche des Werkstücks 10 liegt. Eine solche Fokusslage hat eine positive Konizität des Mikrolochs zur Folge, bei welcher der Lochquerschnitt sich vom Locheintritt zum Lochaustritt hin stark vergrößert.

[0021] Für die Aufweitung des Lochs zum Lochaustritt hin ist die Laserpulsenergie entscheidend. Je mehr Energie zur Verfügung steht, desto stärker kann das Loch aufgeweitet werden. Durch gezielte Einstellung der Pulsenergie über den Bohrfortschritt kann somit eine definierte Konizität erreicht werden.

[0022] Eine weitere Beeinflussung der Konizität des zu erzeugenden Mikrolochs ist über die sog. Fokussier- oder F-Zahl möglich. Die Fokussierzahl ist als Quotient aus der Brennweite der Fokussiereinheit 14 und dem Strahldurchmesser auf der Fokussiereinheit 14 definiert, der über die Aufweitungsoptik 12 beeinflusst werden kann. Diese Fokussierzahl legt bei gegebener Strahlqualität und Wellenlänge die Strahlakustik des Laserstrahls 22 fest. Je kleiner die Fokussierzahl ist, desto größer ist die Aufweitung des Laserstrahls 22 nach dem Fokus 23. Bei ausreichender Energie der Laserpulse läßt sich dadurch die Konizität des Lochs verstärken, und zwar nimmt mit kleiner werdender Fokussierzahl und ausreichender Energie der Laserpulse die Aufweitung des Lochs zum Lochaustritt hin zu.

[0023] Die Steuerung der Energiedichte der Laserpulse über den Bohrfortschritt sowie die Beeinflussung der Fokussierzahl über die Aufweitungsoptik 12 erfolgt über den Rechner 20, wie dies in Fig. 1 angedeutet ist, durch entsprechende Sollwertvorgaben.

[0024] Die Erfindung ist nicht auf das Vorstehend beschriebene Ausführungsbeispiel beschränkt. So kann die Entlangbewegung des Fokus 23 des Laserstrahls 22 längs der Kreisbahn 25 auch mit einem feststehenden, gegenüber der Optikachse der Trepanieroptik 13 um einen kleinen spitzen Winkel angestellten Laserstrahl 22 aus der Vielzahl von Laserpulsen und einer Rotation des Haltekopfs 17 der Werkstückhalterung 16 um seine Achse erreicht werden. Der mechanische Aufwand ist allerdings ungleich größer als durch eine von der Trepanieroptik 13 erzeugte Taumelbewegung des Laserstrahls 22.

[0025] Des weiteren kann über ein definiertes Kippen des das Werkstück 10 haltenden Haltekopfs 17 gegenüber dem Laserstrahl 22 bei gleichzeitiger Rotation des Werkstücks 10 um die Lochachse 24 eine negative oder positive Konizität des zu erzeugenden Lochs beeinflusst werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Einbringen eines Mikrolochs in ein vorzugsweise metallisches Werkstück (10) mittels eines Laserstrahls (22), bei dem der Laserstrahl (22) auf das Werkstück (10) fokussiert und der Fokus (23) fortlaufend auf einer zur Lochachse (24) konzentrischen Kreisbahn (25) entlangbewegt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Laserstrahl (22) aus einer Folge von kurzen Laserpulsen zusammengesetzt wird, die eine konstante, sehr kleine Pulsdauer im Nanosekundenbereich aufweisen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zum Entlangbewegen des Fokus (23) auf der Kreisbahn (25) der Laserstrahl (22) bewegt und/oder das Werkstück (10) in Rotation versetzt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich der Laserstrahl (22) in Rotation um seine Strahlachse versetzt wird.

tion um seine Strahlachse versetzt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-3, dadurch gekennzeichnet, daß der gewünschte Lochdurchmesser durch Einstellen des Durchmessers ($2r_k$) der Kreisbahn (25) festgelegt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-4, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzielung einer definierten Konizität des Lochs mit zum Lochaustritt hin zunehmendem Lochquerschnitt die Lage des Fokus (23) des Laserstrahls (22) relativ zur Werkstückoberfläche (101) in Achsrichtung des Lochs verändert und/oder die Fokussierzahl verkleinert wird und/oder mit zunehmender Eindringtiefe des Laserstrahls (22) in das Werkstück (10) die Pulsenergie vergrößert wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, daß zur Beeinflussung einer Konizität des Lochs das Werkstück (10) gegenüber dem Laserstrahl (22) bei gleichzeitigem Rotieren des Werkstücks (10) um die Lochachse gekippt wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-6, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenlänge der Laserpulse so gewählt wird, daß sie im nahen Infrarot, Ultraviolett oder im sichtbaren grünen Wellenlängenbereich liegt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-7, dadurch gekennzeichnet, daß die Pulsdauer der Laserimpulse kleiner 100 ns und die Pulsenergie der Laserimpulse zwischen 1 bis 7 mJ gewählt wird.

9. Vorrichtung zum Einbringen eines Mikrolochs in ein vorzugsweise metallisches Werkstück (10) mittels eines von einem Lasergenerator (11) erzeugten, aus Laserpulsen bestehenden Laserstrahls (22), dadurch gekennzeichnet, daß der Lasergenerator (11) kurze Laserpulse mit einer konstanten Pulsdauer im Nanosekundenbereich erzeugt und daß die Laserpulse über eine Trepanieroptik (13) geführt sind, die den Laserstrahl (22) um einen spitzen Winkel zur Optikachse neigt und in Rotation versetzt.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Trepanieroptik (13) eine Aufweitungsoptik (12) vorgeordnet und eine Fokussiereinheit (14) nachgeordnet ist, die von den aus dem Lasergenerator (11) austretenden Laserpulsen nacheinander durchlaufen werden.

11. Vorrichtung nach Anspruch 9 oder 10, gekennzeichnet durch eine das Werkstück (10) aufnehmende Werkstückhalterung (16) mit fünf Freiheitsgraden zur Werkstückpositionierung bezüglich des Laserstrahls (22).

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 9-11, dadurch gekennzeichnet, daß die vom Lasergenerator (11) erzeugten Laserimpulse eine Pulsdauer kleiner als 100 ns, eine Pulsenergie von 1-7 mJ und eine im nahen Infrarot, Ultraviolett oder im sichtbaren grünen Wellenlängenbereich liegende Wellenlänge aufweisen.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen



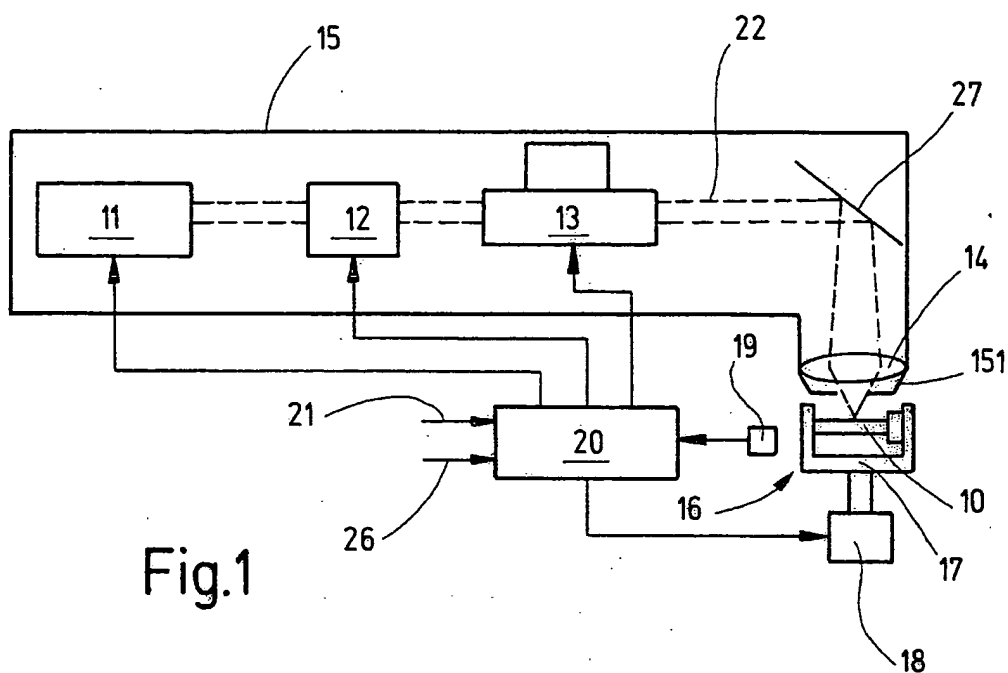


Fig.1

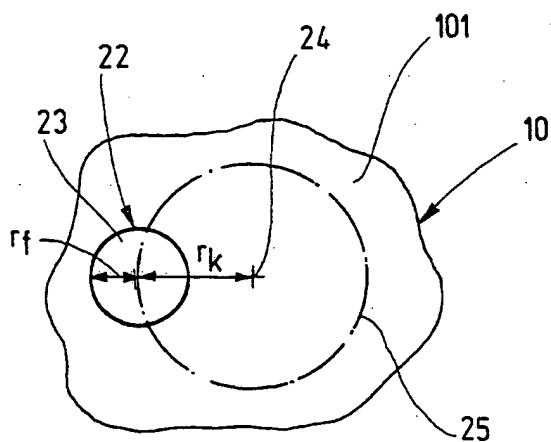


Fig.2

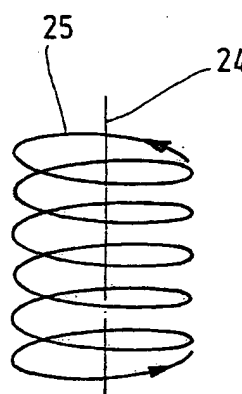


Fig.3

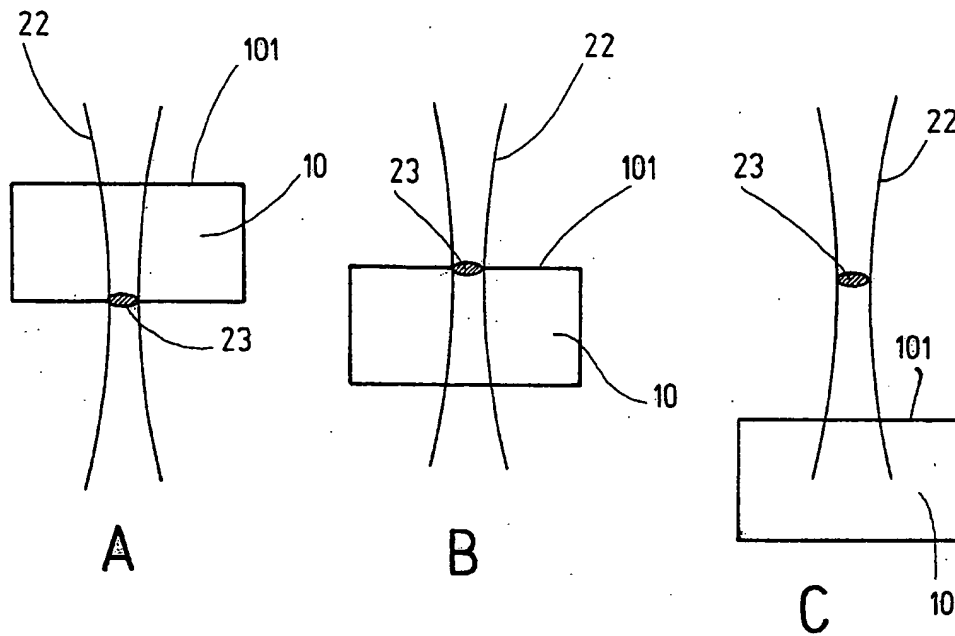


Fig.4